

ностного слоя, механических характеристик покрытия и подложки (выявляемое при измерении микротвердости) и геометрии границы их раздела в борированных образцах сталей 15НЗМА и Ст3 является основной причиной отличия процессов растрескивания боридных слоев при нагружении таких композиций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Панин В.Е.* Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика материалов. 1998. Т. 1. № 1. С. 5-35.
2. *Sizova O., Kolubaev A., Trusova G.* Einfluß der Struktur von Borid-Schutzschichten auf Reibung und Gleitverschleiß // Metall. 1997. № 12. P. 713-717.

УДК 539.3

## МЕХАНИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Г.Д. Федоровский

Россия, С.-Петербург, Государственный университет

Fedorovsky G.D. Mechanical and optical durability criteria of isotropic materials. Simple dynamic mechanical and polarisation-optical durability criteria and relatively universal criteria, applied to static and dynamic monotonous and non-monotonous loading are analysed. The former criteria are based on the conception of incubation time fracture, whereas the latter on the energy principle and phenomenological – integral, hereditary properties description of materials. The criteria suggested are also introduced in the form of damage.

При построении критерия прочности для различных материалов исходят, как правило, из особенностей их определяющих свойств и вида нагружения (статического длительного, кратковременного, циклического и динамического, при простом или сложном напряженном состоянии) [1–4]. Известны критерии, основанные на учете структуры сред [5]. По возможности, для оценки прочности используют какой-либо инвариант, например импульс напряжения в динамике [4].

Анализ свойств многих, в том числе и реологически сложных [6–8] полимерных материалов при различных режимах нагружения, позволяет сделать вывод о том, что инвариантом для них, прежде всего при простом напряженном состоянии, является энергия разрушения [3].

Необходимо отметить, что большинство известных критериев прочности обладают теми или иными ограничениями, связанными с недостаточно обоснованным выбором базы критерия, с селективностью учета свойств материала, интервала и формы нагрузки и с не всегда корректным определением необходимых параметров. Критерии имеют узкую область применения.

В настоящей работе рассмотрены простые различные для статики и динамики и относительно универсальные единые для статики и динамики критерии прочности непрозрачных и прозрачных изотропных материалов при малых деформациях и одноосном растяжении (чистом сдвиге), основанные на феноменологическом подходе, с использованием энергетического принципа и реального оптико-механического поведения сред, пригодные для монотонного и немонотонного нагружения. Для оценки прочности прозрачных сред (стекло и полимеров) рассматривается применение данных информативных экспериментальных методов фотомеханики (поляризационно-оптических методов) [9].

Как известно, энергетический критерий прочности имеет вид:

$$U(t) = \bar{U}^{\sigma\varepsilon} t = \int_0^{\varepsilon(t)} \sigma(\rho) d\varepsilon(\rho) = \int_0^t \sigma(\rho) \frac{d\varepsilon(\rho)}{d\rho} d\rho \leq U_0, \quad (1)$$

где  $U$ ,  $\bar{U}^{\sigma\varepsilon}$ ,  $U_0$  – энергия в момент времени  $t$ ,  $\sigma$  – оператор и энергия разрушения, а  $\sigma$  и  $\varepsilon$  – напряжение и деформация. Значение  $t = t_*$ , при котором  $U = U_0$ , является временем разрушения. Критерий (1) может быть представлен и в безразмерной (нормированной) форме, соответствующей идеологии повреждаемости Качанова [2]:

$$\omega(t) = \frac{U(t)}{U_0} = \bar{\omega}^{\sigma\varepsilon} t = \frac{1}{U_0} \int_0^t \sigma(\rho) \frac{d\varepsilon(\rho)}{d\rho} d\rho \leq 1. \quad (2)$$

Для того чтобы перейти к оптическому критерию, необходимо величины  $\sigma$  и  $\varepsilon$  в (1) или (2) выразить через параметр оптического двуупреломления (оптическую разность хода)  $\delta$  [8].

В случае упругой среды  $\delta = C_\sigma \sigma h$ , т. е.  $\sigma = \frac{\delta}{C_\sigma h}$ , а

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\delta}{EC_\sigma h}, \text{ где } C_\sigma \text{ – оптико-механическая по-}$$

стоянная Вертгейма;  $E$  – модуль Юнга, а  $h$  – толщина образца (объекта). Следовательно,

$$U(t) = \bar{U}^\delta t = \frac{1}{EC_\sigma^2 h^2} \int_0^t \delta(\omega) \frac{d\delta(\omega)}{d(\omega)} d\omega =$$

$$= \frac{\delta^2(t)}{2EC_\sigma^2 h^2} \leq U_0 = \frac{\sigma_0 \varepsilon_0}{2} = \frac{\delta_0^2}{2EC_\sigma^2}.$$

Таким образом, для упругого прозрачного материала оптический критерий статической прочности имеет вид:

$$\frac{\delta(t)}{h} \leq \delta_0, \tag{3}$$

где  $\delta_0$  – отнесенная к толщине оптическая разность хода среды при разрушении. Этот критерий соответствует первой теории прочности ( $\sigma(t) \leq \sigma_0$ ). В безразмерном представлении он имеет форму:

$$\omega(t) = \frac{\delta(t)}{h\delta_0} \leq 1. \tag{4}$$

Простейший механический критерий динамической прочности (откольного разрушения) – структурно-временной критерий [4] для квазиупругого материала – имеет вид:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma(\rho) d\rho \leq \sigma_0. \tag{5}$$

Здесь  $\tau$  – структурное (инкубационное) время. Можно ввести аналогичный оптический критерий динамической прочности:

$$\frac{1}{h\tau} \int_{t-\tau}^t \delta(\rho) d\rho \leq \delta_0, \tag{6}$$

где  $\delta_0$  – статическая оптическая прочность (см. (3)). (6), как и (4), может быть представлен в безразмерном виде:

$$\omega(t) = \bar{\omega}^\delta t = \frac{1}{h\tau\delta_0} \int_{t-\tau}^t \delta(\rho) d\rho \leq 1. \tag{7}$$

В случае деформирования вязкоупругого материала до разрушения связь между  $\sigma$  и  $\varepsilon$ , как и между  $\sigma$  и  $\delta$ , как правило, нелинейная, а соотношение между  $\varepsilon$  и  $\delta$  для многих полимерных материалов можно с достаточным приближением принять в виде уравнения пропорциональности (пьезо-оптического соотношения Неймана). В общей операторной форме эти связи можно представить следующим образом:

$$\sigma(t) = \bar{R}\varepsilon, \quad \varepsilon(t) = \bar{P}\sigma, \quad \sigma(t) = \bar{C}^\delta \delta,$$

$$\delta(t) = \bar{C}^\sigma \sigma, \quad \frac{\delta(t)}{h} = C_\varepsilon \varepsilon(t). \tag{8}$$

Операторы релаксации  $\bar{R}$  и ползучести  $\bar{P}$  должны быть, как и оптико-механические операторы  $\bar{C}^\delta$  и  $\bar{C}^\sigma$ , взаимно обратимыми (обратный оператор не всегда относится к тому же математическому классу, что исходный и, следовательно, может не быть «взаимным», но часто, в приближении, достаточном для практических целей, его можно считать таковым). Условно эта обратимость может быть представлена соотношениями:

$$\bar{R}(\bar{P}^{-1}) = \bar{P}(\bar{R}^{-1}) = 1,$$

$$\bar{C}^\delta (\bar{C}^\sigma)^{-1} = \bar{C}^\sigma (\bar{C}^\delta)^{-1} = 1. \tag{9}$$

$C_\varepsilon$  – постоянная Неймана. Уравнения (9) необходимы для вычисления неизвестных операторов и функций, которыми они определяются через известные. При относительно монотонных статических и динамических нагрузках и деформациях можно использовать простые операторы, соответствующие теории старения – нелинейные функции, например, функцию ползучести Нортон, Прандтля, Дорна и т. п., когда уравнение ползучести принимает вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(0)}{E} + P[t, \sigma(t)]\sigma(t). \text{ При немонотонных на-}$$

грузках и деформациях следует использовать нелинейные интегральные операторы наследственного типа [1, 6–8] (Больцмана – Персо, Вакуленко, Москвитина и т. д.) более полно, чем теория старения, описывающие эффекты откликов на немонотонные воздействия. Например, уравнение ползучести Больцмана – Персо:

$$\varepsilon(t) = \bar{P}\sigma = \int_0^t P[t - \theta, \sigma(\theta)] \frac{d\sigma(\theta)}{d(\theta)} d\theta. \text{ Существуют сре-}$$

ды с заторможенным (Шэпери) и ускоренным (Работнова) последствием. Наиболее универсальной является теория кратных интегралов Вольтерра – Фреше, но ее применение ограничено плохой обусловленностью матриц, используемых для определения функций вязкоупругости, и неинвариантностью учета влияния на свойства среды различных немеханических (температуры, влажности и т. п.) воздействий. Определяющие уравнения «реологически сложных сред» [7], основанные на линейном больцмановском принципе суперпозиции механических откликов в шкале (в общем случае «сложным», нелинейным образом) трансформированного по механическим и иным влияниям времени, лишено этих ограничений и имеет ряд удобств, связанных с квазилинейным представлением и инвариантностью учета различных влияний.

В зависимости от того, что, напряжения или деформации, находится или известно при математическом решении краевой задачи механики или при проведении опытов, механический критерий (1) можно выразить через  $\sigma$  или  $\varepsilon$ , используя соответствующее уравнение из (8):

$$U(t) = \bar{U}^\sigma t = \int_0^t \sigma(\rho) \frac{d(\bar{P}\sigma)}{d(\rho)} d\rho =$$

$$= \bar{U}^\varepsilon t = \int_0^t \bar{R}\varepsilon \frac{d\varepsilon(\rho)}{d(\rho)} d\rho \leq U_0. \tag{10}$$

В безразмерном виде:

$$\omega(t) = \frac{U(t)}{U_0} = \bar{\omega}^\sigma t = \bar{\omega}^\varepsilon t \leq 1. \quad (11)$$

Очевидно, что при построении оптического критерия практически использовать наиболее простое последнее из соотношений (8), связывающее оптическую разность хода  $\delta(t)$  с деформацией  $\varepsilon(t)$ , и выражение для  $\bar{U}^\varepsilon t$  из (10), тогда

$$U(t) = \bar{U}^\delta t = \frac{1}{C_\varepsilon^2 h^2} \int_0^t \bar{R} \delta \frac{d\delta(\rho)}{d(\rho)} d\rho \leq U_0. \quad (12)$$

По идеологии повреждаемости, (12) может быть представлено в форме:

$$\omega(t) = \bar{\omega}^\delta t = \frac{1}{C_\varepsilon^2 h^2 U_0} \int_0^t \bar{R} \delta \frac{d\delta(\rho)}{d(\rho)} d\rho \leq 1. \quad (13)$$

Энергия разрушения  $U_0$  материала может быть определена как площадь диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  при различных видах деформирования. В случае простых видов нагружения или деформирования (например, а)  $\sigma(t) = H(t)\sigma^0$ ,  $\sigma^0 = \text{const}$ ,  $H(t)$  – единичная функция Хевисайда; б)  $\dot{\varepsilon}(t) = \text{const}$ ) критерии принимают вырожденный, простой вид.

Из сравнения (5) и (10) видно, что динамический структурно-временной критерий является частным случаем энергетического, который будет совпадать со структурно-временным, если использовать в нем вырожденное ядро оператора  $\bar{P}$  и наложить ограничение на  $U_0$ .

Проведенное сравнение применения предлагаемых критериев с данными статических и динамических опытов по растяжению и отколу стержней из полиметилметакрилата при режимах а), а также по растяжению в статическом диапазоне поликапроамидных нитей при режимах б) показало удовлетворительное согласие. Расхождение между ними не превысило 15 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Партои В.З., Черепанов Г.П.* Механика разрушения // Механика в СССР за 50 лет. Т. 3. Механика деформируемого твердого тела. М., 1972. С. 365-467.
2. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. М., 1974. 312 с.
3. Разрушение твердых полимеров / Под. ред. Б. Роузена. Пер. с англ. М., 1971. 528 с.
4. *Морозов Н.Ф., Петров Ю.В.* Проблемы динамики разрушения твердых тел. С.-Пб., 1997. 132 с.
5. *Лихачев В.А., Малинин В.Г.* Структурно-аналитическая теория прочности. С.-Пб., 1993. 471 с.
6. *Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д.* Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига, 1975. 416 с.
7. *Федоровский Г.Д.* Определяющие уравнения реологически сложных полимерных сред // Вестн. Ленинград. ун-та. 1990. Сер. 1. Вып. 3. № 15. С. 87-91.
8. *Федоровский Г.Д.* Деформирование реологически сложных полимерных сред: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / СПбГУ. С.-Пб., 1998. 15 с.
9. *Александров А.Я., Ахметзянов М.Х.* Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М., 1973. 576 с.

УДК 541.183+ 539.4+669.788+669.38

## НАВОДОРОЖИВАНИЕ СТАЛИ КАК СЛЕДСТВИЕ ЕЕ РАЗРУШЕНИЯ

© Ю.А. Хрусталева

Россия, Москва, Институт физической химии РАН

Khrustaleva Y.A. Hydrogen increase in steels as a result of its destroying. The increase of hydrogen concentration in steels is discussed from the point of view of physical and chemical processes accompanying the appearance of fresh surfaces after mechanical decomposition.

К проблеме наводороживания конструкционных материалов и их водородной хрупкости привлечено внимание исследователей вследствие все более широкого использования водорода в технике (удобный энергоноситель космических кораблей, атомная энергетика, высококалорийное топливо и т. п.), что важно и с точки зрения улучшения экологии (в частности, радиационная очистка сточных вод).

Известно, что проникновение водорода в металл часто приводит к ухудшению эксплуатационных свойств. Особенно сильно уменьшается сопротивление механическим напряжениям из-за снижения пластич-

ности. Водород способен образовывать с металлом новую фазу – гидриды. В двух- и трехмерных дефектах он молизуется, повышая внутреннее давление газа в деталях машин. При взаимодействии с углеродом возникает метан, что ведет к обезуглероживанию сталей и дополнительно повышению внутренних напряжений. Конечным результатом накопления водорода в металле является резкое снижение прочности и долговечности деталей и хрупкое катастрофическое их разрушение (водородная хрупкость).

Автор проблему наводороживания конструкционных материалов на примере сталей рассматривает с